

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

学号: 19920131152920

UDC \_\_\_\_\_

DC-DC 同步降压转换 LED 驱动 IC 设计

胡晔

指导老师

冯勇建  
教授

厦门大学

厦门大学

硕 士 学 位 论 文

# DC-DC 同步降压转换 LED 驱动 IC 设计

Design of a DC-DC Synchronous Buck LED driver

胡晔

指导教师姓名: 冯勇建 教授

专 业 名 称: 机械工程

论文提交日期: 2016 年 4 月

论文答辩时间: 2016 年 5 月

学位授予日期: 2016 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2016 年 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

声明人(签名):

年 月

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

☐ 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 20 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

☐ 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘要

驱动电源电路是大功率 LED 光源设计的关键技术，由于发展时间较短，目前大功率 LED 驱动电源依旧处于发展和完善阶段，驱动电源技术成为目前大功率 LED 的短板。本文针对路灯、舞台灯、车灯等大功率 LED 照明应用中驱动电源转化效率低、恒流精度不高、调光精度差等问题，设计了一款高效率、高恒流精度、PWM 信号精确调光的同步降压型 LED 驱动芯片。

本文针对大功率 LED 的电气特性以及驱动电源的相关技术要求，提出了滞环电流控制、无需谐波补偿的同步 Buck 开关电源结构，提高了芯片的转化效率。设计了专用的高边电流检测放大器以及滞回控制环路，恒流精度达到 $\pm 15\%$ ，最高可稳定输出 10A 电流，115mV/85mV 的超低反馈电压最大限度减少了功率的损耗。设计了 PWM 调光控制电路，内部快速开关频率高达 1MHz，可兼容 100Hz~25KHz 的 PWM 信号调光，提高了芯片的调光精度。设计了级联推挽反相器结构电路对功率 MOS 管进行驱动，驱动对管分级打开改善了 EMI 的问题。设计了非重叠时相的同步控制电路解决了同步电路的交叉导通问题，自举电路为高端 MOS 的栅极提供了驱动电压，电平转换电路解决了从控制信号到高端 MOS 栅极驱动之间的电平转换问题。集成肖特基二极管与低端 MOS 并联，解决了同步电路的死区时间的问题。此外，设计了上电复位模块确保了芯片的正常启动，欠压锁定模块和过温保护模块确保了芯片在特殊情况下依然安全可靠。芯片采用钼晶电子 0.18 $\mu\text{m}$  线宽 CMOS 工艺，综合成本、散热等方面的因素采用了 SOP8 封装。在设计版图时采用多种保护措施，有效降低了天线效应、ESD、闩锁效应对芯片整体工作性能的影响。

对流片回来的芯片样品进行了测试，测试结果显示芯片各项电气参数和功能都达到预期目标。在 7~60V 的输入电压范围内，能根据负载 LED 的个数自动调整输出电压，提供 1~10A 的驱动电流，转换效率达到 95%以上。测试结果达到预期，在 LED 驱动电源的转换效率、恒流精度和调光精度上高于市场同类产品，有良好的市场前景。

**关键词：**同步降压；高边电流检测；版图设计

## Abstract

Driving power supply circuit is the key technology of the high power LED light source design, due to the short development time, driving power of high power LED is still in the stage of development and perfection at present, driving power supply technology has become the short board of the high power LED. The application of high power LED such as street lamp, stage lights, car lights, it's driving power conversion efficiency is low, the constant current accuracy is not high, the dimming precision is poor. To solve this problem, this paper design a synchronous buck LED driver chip of high efficiency, high precision of LED current and high PWM dimming precision.

The structure of the synchronous Buck switching power supply controlled hysteresis current and with no harmonic compensation is realized, which improves the conversion efficiency of the chip. The paper design a special high side current sense amplifier with hysteresis loop, The accuracy of constant current reached  $\pm 15\%$ , its 115mV/85mV ultra low feedback voltage minimize the power loss. The PWM dimming circuit is designed, the internal fast switching frequency is as high as 1MHz, which allows for 100Hz to 25kHz PWM dimming, and improve the accuracy of the LED dimming. Design a cascade push-pull inverter circuit to drive the power MOS, open the drive tube step by step to reduce EMI of the LED driver power supply. Non-overlap circuit is designed to solve the problem of cross-conduction of synchronous buck circuit, bootstrap circuit is designed to provide the driving voltage of gate for high side MOS, levelshift circuit is designed to conversion the electrical level from the logic signal to high-side MOS gate. Integrated Schottky diode parallel with the low side MOS, to solve the problem of the dead time. In addition, This paper design the power on reset module to ensure the normal start of the chip, under voltage lockout module and over temperature protection module to ensure the safety and reliability of the chip under abnormal circumstances. Using Maxchip 8A Power 0.18um-E 6V\_40V 2P3M BCDMOS Process of which high pressure MOS power can work in 60V and virtuoso layout editor software of cadence platform to draw the chip layout. using the SOP8 package after

comprehensive cost, heat and other factors. A variety of protective measures are adopted to effectively reduce the effect of antenna effect, ESD and latch up effect on the overall performance of the chip when designing layout.

Chip samples were tested, the test results show that the electrical parameters and functions of the chip to achieve the desired goal. In the range of input voltage of 7 ~ 60V, the output voltage can be adjusted automatically according to the number of the load LED, the driving current of 1 ~ 10A is provided, and the conversion efficiency is more than 95%. Test results achieved the desired results, the conversion efficiency, constant current accuracy and dimming accuracy of the LED drive power is higher than similar products in the market, there is a good market prospects.

**Key words:** synchronous buck; high side current sense; layout design

# 目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第一章 绪论.....	1
1.1 国内外大功率 LED 照明的发展现状和前景.....	1
1.2 本课题的研究背景和意义.....	2
1.3 本课题的主要工作内容.....	3
第二章 同步降压 LED 驱动芯片的原理和结构设计.....	5
2.1 LED 特性和驱动方式.....	5
2.1.1 LED 的发光原理和电气特性.....	5
2.1.2 LED 的驱动方式.....	7
2.2 同步降压 Buck 电路.....	12
2.3 同步 Buck 电路的控制方式.....	14
2.3.1 电压控制模式.....	15
2.3.2 电流控制模式.....	16
2.4 同步降压 LED 驱动芯片整体方案设计.....	20
2.4.1 芯片的典型应用线路及工作原理.....	20
2.4.2 芯片的内部框架结构设计.....	21
第三章 基本模块电路的设计和仿真.....	23
3.1 稳压电源模块设计.....	23
3.1.1 DC-DC 降压电路设计.....	23
3.1.2 线性稳压电路设计.....	24
3.2 基准源模块设计.....	25
3.2.1 带隙基准电路设计.....	26

3.2.2 PTAT 电流源电路设计.....	33
3.2.3 过温保护电路设计.....	35
<b>3.3 参考电压修正电路设计.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 欠压锁定电路设计.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 上电复位电路设计.....</b>	<b>43</b>
<b>第四章 同步降压 LED 驱动芯片的核心模块设计.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 驱动控制电路设计.....</b>	<b>46</b>
4.1.1 驱动电路设计.....	46
4.1.2 栅极控制电路设计.....	47
4.1.3 死区时间.....	48
4.1.4 电磁干扰.....	49
4.1.5 自举电路.....	50
4.1.6 电平转换电路.....	51
<b>4.2 高边电流检测电路设计.....</b>	<b>52</b>
4.2.1 高边电流检测.....	52
4.2.2 传统的高边电流检测放大器.....	54
4.2.3 专用高边电流检测放大器设计.....	55
<b>4.3 PWM 调光控制电路设计.....</b>	<b>59</b>
<b>4.4 逻辑控制电路设计.....</b>	<b>61</b>
<b>4.5 芯片整体仿真分析.....</b>	<b>61</b>
<b>第五章 芯片的版图设计和测试.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 芯片的封装类型.....</b>	<b>65</b>
<b>5.2 芯片的引脚定义.....</b>	<b>66</b>
<b>5.3 关键器件的匹配设计.....</b>	<b>67</b>
5.3.1 MOS 管的匹配设计.....	67
5.3.2 电阻的匹配设计.....	70
5.3.3 三极管的匹配设计.....	70



<b>5.4 天线效应、ESD 保护及闩锁效应.....</b>	<b>71</b>
5.4.1 天线效应.....	71
5.4.2 ESD 保护.....	72
5.4.3 闩锁效应.....	73
<b>5.5 版图设计.....</b>	<b>74</b>
5.5.1 版图几何设计规则.....	75
5.5.2 版图设计的一般步骤.....	76
5.5.3 版图验证.....	76
<b>5.6 芯片的电气特性参数及可测性.....</b>	<b>78</b>
<b>5.7 测试方法及结果.....</b>	<b>79</b>
5.7.1 各电气参数的测试方法.....	79
5.7.2 测试结果.....	86
<b>5.8 测试结果分析以及参数调整方法.....</b>	<b>89</b>
5.8.1 测试结果数据分析.....	89
5.8.2 参数调整方法.....	90
<b>第六章 总结与展望.....</b>	<b>92</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>94</b>
<b>攻读硕士学位期间的科研成果.....</b>	<b>98</b>

## Table of Contents

<b>Abstract in Chinese.....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract in English.....</b>	<b>II</b>
<b>Table of Contents in Chinese.....</b>	<b>IV</b>
<b>Table of Contents in English.....</b>	<b>7</b>
<b>Chapter1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
1.1 Development status and Prospect of high power LED lighting .....	1
1.2 Research background and significance of this project.....	2
1.3 The main work of this subject.....	3
<b>Chapter2 Implementation and Analysis of The Whole IC Solution.....</b>	<b>5</b>
2.1 LED Characteristics and Driving Mode.....	5
2.1.1 The Principle of LED.....	5
2.1.2 Driving Mode of LED.....	7
2.2 Synchronous Buck.....	12
2.3 The Control mode of Synchronous Buck.....	14
2.3.1 Voltage control mode.....	15
2.3.2 Current control mode.....	16
2.4 Implementation and Analysis of Synchronous Buck LED driver.....	20
2.4.1 Typical application of the chip and working principle of the system.....	20
2.4.2 Module partition of the chip and the role of the functional modules.....	21
<b>Chapter3 Design and simulation of basic circuit module.....</b>	<b>23</b>
3.1 The Voltage Regulator Circuits.....	23
3.1.1 DC_DC Step down Circuit.....	23
3.1.2 Low Dropout Regulator.....	24

<b>3.2 The Reference Source Circuits.....</b>	<b>25</b>
3.2.1 Design and Simulation of Bandgap.....	26
3.2.2 Design and Simulation of PTAT Current Source.....	33
3.2.3 Design and Simulation of Over Temperature Protection Circuit.....	35
<b>3.3 The Reference Voltage Correction Circuits.....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 The Undervoltage Detection Circuits.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 The Power on Reset Block.....</b>	<b>43</b>
<b>Chapter4 Core module of synchronous buck LED driver chip.....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 The Driving Control Circuits.....</b>	<b>46</b>
4.1.1 The Driving Circuits.....	46
4.1.2 The Control Circuits.....	47
4.1.3 Deadtime.....	48
4.1.4 EMI.....	49
4.1.5 Bootstrap Circuits.....	50
4.1.6 Levelshift Circuits.....	51
<b>4.2 The Design and Simulation High-side Current Sense Circuits.....</b>	<b>52</b>
4.2.1 High-side Current Sense Circuits.....	52
4.2.2 Traditional High-side Current Sense Circuits.....	54
4.2.3 Dedicated High-side Current Sense Circuits.....	55
<b>4.3 The PWM Dimming Circuits.....</b>	<b>59</b>
<b>4.4 Logic Control Circuits.....</b>	<b>61</b>
<b>4.5 Overall simulation and analysis of the chip.....</b>	<b>61</b>
<b>Chapter5 Layout Design and Test of the chip.....</b>	<b>65</b>
<b>5.1 The Package Style.....</b>	<b>65</b>
<b>5.2 The pin definition.....</b>	<b>66</b>
<b>5.3 Matching of key Devices.....</b>	<b>67</b>
5.3.1 Matching of MOSFET.....	67

5.3.2 Matching of Resistor.....	70
5.3.3 Matching of BJT.....	70
<b>5.4 Antenna effect, ESD protection and Latch up.....</b>	<b>71</b>
5.4.1 Antenna effect.....	71
5.4.2 ESD protection.....	72
5.4.3 Latch up.....	73
<b>5.5 Design of Layout.....</b>	<b>74</b>
5.5.1 Geometric rules of layout design.....	75
5.5.2 The general layout design procedure.....	76
5.5.3 The verification of layout.....	76
<b>5.6 Electrical characteristic parameters and measurement of chip.....</b>	<b>78</b>
<b>5.7 The testing methods and results.....</b>	<b>79</b>
5.7.1 Testing methods.....	79
5.7.2 Testing results.....	86
<b>5.8 Possible Problems And the solutions.....</b>	<b>89</b>
5.8.1 Data analysis of test results.....	89
5.8.2 Parameter adjustment method.....	90
<b>Chapter6 Summary and Prospect.....</b>	<b>92</b>
<b>Reference.....</b>	<b>94</b>

## 第一章 绪论

### 1.1 国内外大功率 LED 照明的发展现状和前景

照明技术的物质基础是光源,照明技术的发展是基于光源技术发展的。由于环境、能源问题的加重,可持续发展受到普遍关注,低碳经济逐渐受到全球的重视。照明作为电能消耗的重要方式,每年消耗全球近 20% 的电能,这其中 90% 都被转换成热能白白损耗掉,既不节能也不经济<sup>[1]</sup>。自 20 世纪 90 年代三位日裔科学家赤崎勇、天野浩和中村修二在 GaN 基蓝光 LED 技术取得的重大突破以来,LED 技术快速发展。这也强有力地推动了照明技术的发展,已经并将对照明技术产生巨大的变革。与传统的白炽灯、荧光灯、气体放电灯相比,LED 因其高节能、高亮度、高寿命、小体积、利环保等优点,被称为绿色光源或者第四代照明光源<sup>[2-3]</sup>。在节能环保的发展战略下,LED 已快速成为颇受关注的技术和产业。世界各国政府积极制定促进 LED 产业发展的政策法规,在政策导向激励下,全球 LED 产业规模呈快速增长之势<sup>[4]</sup>。随着 LED 照明技术的快速迅猛发展,其市场应用必将更加广泛。尤其是在全球能源枯竭的大形势下,LED 照明的发展前景将更加举世瞩目<sup>[5]</sup>。传统的、以高强度气体放电灯为代表的大功率照明产品有着广泛的应用,在整体数量上占照明中的大部分,所消耗的电能所占的比例也最高。由此可见,节能减排对于大功率照明产品尤为重要<sup>[6]</sup>。

随着科技的不断进步,半导体材料应用技术的高速发展,小功率 LED 光源已广泛应用于景观照明、家庭照明等领域<sup>[7]</sup>。伴随着大功率 LED 照明产品的技术突破,其在工业、商业、道路、桥梁等相关领域得到了积极的推广,获得了大量的应用,是目前最有力的、传统大功率照明产品的替代者,国际上主要的 LED 照明公司也都有相应的产品投入使用<sup>[8]</sup>。大功率 LED 照明产品的发展是曲折行进的:开始主要是对传统照明产品的模仿,由于光效低、寿命短、价格高、维修困难,因此市场难以接受;后来逐步发展为高光效、长寿命、价格适中、维修便利、外观优美,高品质光输出、单灯智能控制等性能优越的新一代照明产品,并逐渐被市场所接受<sup>[9]</sup>。目前,大功率 LED 商业化产品的光效已经达到 150lm/W 以上,寿命达到 30000 个小时以上,这些使得 LED 的综合性能已经超越了其它光源。同时,除特别大的功率外,LED 灯具的价格已经接近其它

光源组成的灯具，因此，相对来说，LED 已经具有一定的优势。同时，LED 的实验室产品光效已经达到 300lm/W 以上，且通过合理的散热设计，50000 小时以上的寿命是完全可以达到的，因此 LED 还有很大的提升空间。从原理上讲，其它光源在光效和寿命方面提升的空间不大。因此，可以预计，LED 成为照明产品的主要光源应该是指日可待<sup>[10]</sup>。

当前我国正在正在创建资源节约型、环境友好型社会，“绿色照明”的概念也在逐步深入人心。与西方发达国家比较起来，我国的 LED 发展及研究均显得比较晚。近年来，随着我国对节能减排这项工作的开展，对 LED 技术的研究也成为我国一项重要研究课题<sup>[11]</sup>。因此，我国在 LED 技术方面的研究正追随着西方发达国家的步伐，从而对 LED 技术的研究也是越来越成熟。现阶段，我国已经具备了初始阶段的 LED 产业规模。主要在外延与芯片方面的研究较为广泛。为了使 LED 研究成果得到有效展现，我国投入了大量的人力资源和物力资源，殷切希望的是产品的可靠性得到逐渐提升<sup>[12]</sup>。

## 1.2 本课题的研究背景和意义

随着 LED 的发展<sup>[13-15]</sup>，其驱动 IC 的研究也大大的加快了<sup>[16-18]</sup>。LED 不同于传统的卤钨灯和气体放电灯，它对驱动电压的波动十分敏感，且具有负温度特性，不能直接接入市电中，因此需要合适的驱动电路<sup>[19]</sup>。从 LED 照明产业的发展能够显而易见的发现，LED 驱动技术发展的配合对推动 LED 产业的发展至关重要<sup>[20]</sup>。LED 照明产业的健康快速发展需要可靠的 LED 驱动电源做保障，LED 灯具的质量很大程度上取决于 LED 驱动电源的质量<sup>[21]</sup>。

驱动电源电路是大功率 LED 光源设计的关键技术，目前，小功率 LED 驱动电源发展得比较成熟<sup>[22]</sup>，但在大功率 LED 照明领域，由于发展时间较短，大功率 LED 驱动电源依然处于发展和完善阶段，驱动电源技术成为目前大功率 LED 的短板<sup>[23]</sup>。节能高效是 LED 的主要优势，目前国内的大功率 LED 驱动芯片大多采用开关电源架构，整体的效率在 85%~90%，而从国外进口的芯片整体效率普遍在 90%以上，因此国内的大功率 LED 驱动芯片效率仍有待提高<sup>[24]</sup>。恒流精度是判断 LED 驱动电源好坏的重要标准，目前国内的大功率 LED 驱动芯片，不仅反馈电压高影响效率，而且恒流精度也不好，很多都在±30%左右。作为一种高效节能的光源，调光功能对 LED 驱动电源来说是非常

重要的, 通过对 LED 亮度的调节达到进一步节能减排的目的。目前国内的大功率 LED 驱动芯片大多采用模拟调光, 很难实现精确控制, 而且在改变 LED 的亮度时会导致 LED 的光谱及色温改变, 影响 LED 的发光质量。国内的少数采用 PWM 调光的驱动芯片, 也存在着调光精度不高, 调光兼容性不好的问题<sup>[25]</sup>。另外, 目前市面上的大多数大功率 LED 驱动芯片, 功率 MOS 大多是外置的, 这无疑增加了 LED 驱动电源的整体成本。因此, 开发适用于 LED 舞台灯的高效率、高恒流精度、高调光精度、功率 MOS 内置的大功率 LED 驱动芯片迫在眉睫, 不仅有很深的学术意义, 更有广阔的市场前景。

### 1.3 本课题的主要工作内容

本文针对目前国内大功率 LED 驱动芯片普遍效率较低、恒流精度不高、调高效果不好的发展现状, 研究设计了一款同步降压型 LED 驱动芯片, 其采用内置功率 NMOS, 可实现 7V~60V 的宽电压输入, 效率达到 95% 以上; 采用滞环电流控制模式, 恒流精度达到  $\pm 15\%$ ; 通过外部反馈电阻设定 LED 电流值, 最高可稳定输出 10A 电流; 采用高侧电流检测, 115mV/85mV 的超低反馈电压可最大限度地减小功率的消耗; 调光兼容性好, 可兼容 100HZ~25KHZ 的 PWM 信号调光; 内部工作开关频率可达 1MHz 以上, 同时具有过温保护功能; 电路采用钼晶电子 (Maxchip) 0.18um 线宽 6V/40V BCDMOS 工艺, 利用 Cadence 平台的仿真软件 Hspice 对各个功能模块以及整体线路进行了仿真, 并运用 Cadence 平台的 Virtuoso Layout Editor 软件绘制了芯片版图, 并送交代工厂进行生产, 并对生产回来的芯片样片进行了测试, 对测试结果运用  $6\sigma$  分析方法进行了参数分析, 确定了芯片参数的合格范围, 为芯片的大批量生产测试提供了判断依据。本文各章节内容安排如下:

第二章为芯片的原理和结构设计, 介绍了 LED 的基础电气特性、发光原理以及三种典型的驱动方式; 分析了同步降压 Buck 电路相对于传统开关电源的优势, 介绍了同步降压 Buck 电路的控制方式; 分析设计了本芯片的典型应用线路、工作原理以及内部框架构架。

第三章分析设计了芯片基本功能模块电路, 包括稳压电源模块、基准源模块、欠压锁定模块、上电复位模块和参考电压修正控制模块, 并利用仿真软件 Hspice 对各个功能模块进行了仿真验证, 调整线路及器件参数, 使其满足设计要求;

第四章介绍了本文设计的同步降压 LED 驱动芯片的核心功能模块电路设计，包括驱动控制模块、高边电流检测模块、PWM 调光控制模块以及逻辑控制模块，并利用仿真软件 Hspice 对各个功能模块以及整体线路进行了仿真验证。

第五章阐述了绘制芯片版图时一些常用技术及注意事项，选用钜晶电子 (Maxchip) 0.18 $\mu\text{m}$  线宽 6V/40V 2P3M BCDMOS 工艺，运用 Virtuoso Layout Editor 软件绘制了芯片版图，送交晶圆厂生产封装；详细介绍了芯片各电气特性参数及其测试方法，绘制 PCB 并制作样板对芯片功能进行验证，对相关电气参数进行测试，然后对测试结果进行分析；

第六章为对论文的总结和展望。



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.